

Analisis Struktur Kristal $\text{SrO.6Fe}_2\text{O}_3$ Menggunakan Program General Structure Analysis System dan Pengujian Sifat Magnetnya (Perdamean Sebayang)

Akreditasi LIPI Nomor : 452/D/2010
Tanggal 6 Mei 2010

ANALISIS STRUKTUR KRISTAL $\text{SrO.6Fe}_2\text{O}_3$ MENGUNAKAN PROGRAM *GENERAL STRUCTURE ANALYSIS SYSTEM* DAN PENGUJIAN SIFAT MAGNETNYA

Perdamean Sebayang¹, Muljadi¹ dan Wisnu Ari Adi²

¹Pusat Penelitian Fisika (P2F) - LIPI

Kawasan Puspiptek, Serpong 15314, Tangerang

²Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir (PTBIN) - BATAN

Kawasan Puspiptek, Serpong 15314, Tangerang

e-mail: pard003@lipi.go.id

ABSTRAK

ANALISIS STRUKTUR KRISTAL $\text{SrO.6Fe}_2\text{O}_3$ MENGGUNAKAN PROGRAM GENERAL STRUCTURE ANALYSIS SYSTEM DAN PENGUJIAN SIFAT MAGNETNYA. Telah dilakukan analisis bahan magnet *single phase* $\text{SrO.6Fe}_2\text{O}_3$ dengan menggunakan *General Structure Analysis System (GSAS)* dan pengukuran sifat magnetnya dengan menggunakan *Vibrating Sample Magnetometer (VSM)*. Bahan magnet $\text{SrO.6Fe}_2\text{O}_3$ dibuat dengan metode reaksi padatan menggunakan proses *mechanical alloying* dan *disintering* pada suhu 1200 °C selama 10 jam. Hasil *refinement* dari pola difraksi sinar-X menunjukkan bahwa telah terbentuk *single phase* bahan magnet sistem $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ dengan struktur kristal heksagonal (grup ruang P 63/mmc), parameter kisi $a = b = 5,9033(5)$ Å dan $c = 23,239(2)$ Å, $\alpha = \beta = 90^\circ$ dan $\gamma = 120^\circ$, volume unit sel sebesar $V = 701.3(1)$ Å³ dan kerapatan atomik sebesar $\rho = 5,72$ g.cm⁻³. Struktur heksagonal ini dibangun menjadi 4 blok sub unit yang disebut dengan 2 blok sub unit S ($\text{Fe}_6^{3+}\text{O}_8^{2-}$)²⁺ dan 2 blok sub unit R ($\text{Sr}^{2+}\text{Fe}_6^{3+}\text{O}_{11}^{2-}$)²⁻. Hasil pengukuran sifat magnetik menunjukkan bahwa bahan $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ memiliki medan koersivitas, magnetisasi saturasi, dan magnetisasi remanen berturut-turut adalah 1650 Oe, 63,21 emu/g dan 48,01 emu/g.

Kata kunci: $\text{SrO.6Fe}_2\text{O}_3$, *Mechanical alloying*, Struktur kristal, Sifat magnet

ABSTRACT

ANALYSIS OF CRYSTAL STRUCTURE $\text{SrO.6Fe}_2\text{O}_3$ USING GENERAL STRUCTURE ANALYSIS SYSTEM AND ITS MAGNETIC PROPERTIES . The analysis of $\text{SrO.6Fe}_2\text{O}_3$ single phase has been performed by using General Structure Analysis System (GSAS) and its magnetic properties has been measured by using Vibrating Sample Magnetometer (VSM). The $\text{SrO.6Fe}_2\text{O}_3$ magnetic material system is synthesized by solid state reaction method through the mechanical alloying process and sintered at 1200 °C for 10 hours. The refinement result of x-ray diffraction showed that the single phases of the $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ magnetic material system is formed with the hexagonal crystal structure (space group P 63/mmc), lattice parameters $a = b = 5.9033(5)$ Å and $c = 23.239(2)$ Å, $\alpha = \beta = 90^\circ$, $\gamma = 120^\circ$, cell unit volume 701.3(1) Å³, and atomic density of 5.72 g.cm⁻³. The hexagonal structure with space group P 63/m m c is constructed from 4 building blocks, namely two S blocks ($\text{Fe}_6^{3+}\text{O}_8^{2-}$)²⁺ and two R blocks ($\text{Sr}^{2+}\text{Fe}_6^{3+}\text{O}_{11}^{2-}$)²⁻. The result from magnetic properties measurement showed that the sample has coercive field, saturated magnetization, and remanence magnetization of 1650 Oe, 63.01 emu/g and 48.21 emu/g respectively.

Kata kunci: $\text{SrO.6Fe}_2\text{O}_3$, Mechanical milling, Crystal structure, Magnetic properties

PENDAHULUAN

Ferrite memiliki struktur yang sangat beragam bergantung pada komposisi pembentuknya. Apabila ditinjau berdasarkan penyusunan kisi kristal utamanya, *ferrite* dapat digolongkan menjadi tiga kelas utama, yaitu: *Spinnel*, *Garnet*, dan *Hexagonal*. Struktur *spinnel* memiliki jari-jari atom bervariasi sehingga mampu membentuk fasa dengan kombinasi yang beragam,

namun tidak semua kombinasi tersebut dapat menghasilkan fasa *solid solution* [1].

Struktur *garnet* ditemukan dalam bentuk $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, lazim disebut *Yttrium Iron Garnet* [2], *Garnet* memiliki struktur yang sangat kompleks. Dalam satu unit sel kubus terdapat 160 atom yang terdiri dari 96 ion O^{2-} bertindak sebagai anion, 24 ion Y^{3+} yang bertindak

sebagai kation, 24 ion Fe^{3+} tersusun secara tetrahedral, dan 16 ion Fe^{3+} tersusun secara octahedral [3]. Semua ion-ion tersebut membentuk satu struktur yang hampir sama dengan *Spinnel*. Oleh karena Ytrium memiliki jari-jari atom yang sangat besar sehingga mampu mendistorsi kisi dan membentuk struktur *Garnet*.

Jenis ketiga adalah struktur heksagonal atau sering disebut dengan struktur bahan *hexaferrite*. Bahan *hexaferrite* bila ditinjau dari struktur kristalnya dapat dibedakan menjadi 6 tipe, yaitu: M, W, Y, Z, X, dan U [4]. Tipe M disebut juga dengan struktur magnetoplumbit, salah satu diantaranya yang populer adalah $\text{BaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$. Struktur $\text{BaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ tersusun atas 2 blok *spinnel* untuk membentuk struktur Fe_6O_8 dalam susunan S dan S*, dan blok R yang berisi ion Barium dan Oksigen membentuk struktur $\text{BaFe}_6\text{O}_{11}$ [4]. Struktur kristal tipe M ini berisi ion-ion yang tersusun secara RSR*S*. Jumlah perbandingan antara BaO dan Fe_2O_3 tipe M konvensional ini memiliki rasio sebesar 1 : 6. *Hexaferrite* tipe M ini memiliki medan anisotropi (H_a) sangat tinggi hingga mencapai 35 kG dengan konstanta anisotropi kristal sebesar $3,3 \times 10^5 \text{ Jm}^{-3}$ [5]. Sehingga bahan *hexaferrite* tipe M berpotensi untuk digunakan sebagai magnet permanen dengan menghasilkan energi produk maksimum magnet sebesar $45,26 \text{ kJ.m}^{-3}$.

Senyawa yang memiliki struktur *hexaferrite* tipe M lainnya adalah $\text{SrO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ yang memiliki perbandingan mol antara SrO dengan Fe_2O_3 sebesar 1 : 6. Karakteristik fisis (jari-jari atomik, kovalen, dan kerapatan atomik) dari atom Stronsium jauh lebih kecil dibandingkan dengan atom Barium, sehingga sangat menarik untuk dikaji struktur kristalnya dan dibandingkan dengan $\text{BaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$.

Pada penelitian ini akan dilakukan pembuatan *single phase* bahan magnet sistem $\text{SrO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ dengan menggunakan metode *mechanical alloying* dan dilanjutkan dengan proses *sinter* pada suhu 1200°C selama 10 jam. Dari hasil pembuatan *single phase* bahan magnet sistem $\text{SrO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ kemudian dianalisa struktur kristalnya dengan menggunakan perangkat lunak *General Structure Analysis System (GSAS)* [6] dan untuk analisa strukturmikro digunakan alat *Scanning Electron Microscope (SEM)*. Sedangkan sifat magnetnya diukur dengan menggunakan *Vibrating Sample Magnetometer (VSM)*. Jadi lingkup bahasan pada penelitian ini dikhususkan pada tinjauan parameter struktur kristal, strukturmikro dari bahan magnet sistem $\text{SrO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ dan korelasinya terhadap sifat magnetiknya.

METODE PERCOBAAN

Sintesis bahan $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ dilakukan dengan menggunakan metode reaksi padatan dari oksida-oksida penyusun: SrCO_3 dan Fe_2O_3 , dimana perbandingan stoikiometri unsur Sr : Fe = 1 : 12. Bahan-bahan tersebut diperoleh dari produk Merck dengan kemurnian lebih dari 99 %, kemudian dicampur dengan menggunakan alat *milling* yang berada di Pusat Penelitian Fisika - Lembaga

Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI). Alat *milling* ini mempunyai spesifikasi normal *speed* = 1400 rpm, *run time* = 90 menit, *of time* = 30 menit dan *on of cycle* = 1 kali. Dimensi *vial High Energy Milling (HEM)*, panjang = 7,6 cm dan diameter = 5,1 cm. Adapun bahan bolanya terbuat dari *stainless steel* dengan diameternya sebesar 10 mm. Tujuan dari proses *milling* ini adalah untuk memperoleh campuran yang homogen dan ukuran partikel yang relatif lebih kecil. Dengan demikian, diharapkan pada saat proses *sintering* akan memudahkan terjadinya difusi antar partikel sehingga akan terbentuk paduan yang *single phase* sesuai dengan Persamaan (1).



Campuran dari hasil proses *milling* kemudian dibuat sampel berbentuk pelet dengan diameter 2 cm dan ketebalan 2 mm, melalui proses kompaksi dengan tekanan sebesar 2 ton. Sampel pelet tersebut kemudian *disintering* pada suhu 1200°C selama 10 jam dan didinginkan di dalam lingkungan *furnace*. Selanjutnya pelet hasil proses *sintering* tersebut diambil sedikit untuk digerus kembali sebagai cuplikan untuk sampel uji, baik untuk analisis struktur kristal, strukturmikro dan sifat magnetiknya.

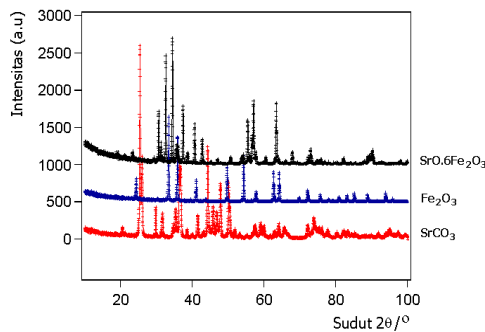
Untuk analisis kualitas dan kuantitas dari fasa yang ada di dalam sampel diukur dengan menggunakan alat *X-Ray Diffractometer (XRD) Philip* tipe PW1710. Pengukuran pola difraksi sampel dilakukan dengan berkas sinar-X dari *tube anode Cu (copper)* dengan panjang gelombang, $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$, *mode* = *continuous-scan*, *step size* = $0,02^\circ$ dan *time per step* = 0,5 detik. Pengamatan strukturmikro dan analisis elementer dilakukan dengan menggunakan alat *Scanning Electron Microscope (SEM)* merek JEOL. Sedangkan sifat magnetik bahan diuji dengan menggunakan peralatan *Vibrating Sample Magnetometer (VSM)* merek Oxford, Ketiga pengujian tersebut dilakukan di laboratorium Karakterisasi dan Analisis Nuklir, PTBIN - BATAN.

HASIL DAN PEMBAHASAN

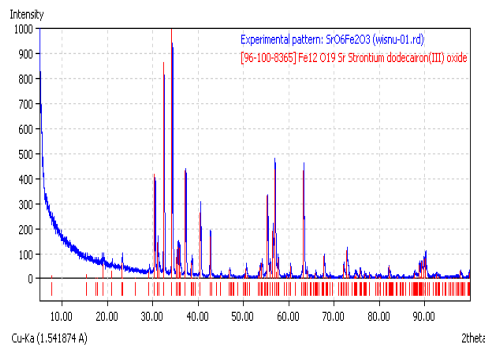
Dari proses *sintering* bahan baku tersebut diharapkan terjadinya difusi antara partikel sehingga terbentuknya paduan sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 1. Pengukuran pola difraksi sinar-X dari bahan baku yang digunakan dari hasil *sinter* pada suhu 1200°C ditunjukkan seperti pada Gambar 1.

Pada Gambar 1 menunjukkan bahwa serbuk SrCO_3 yang telah dicampur dengan Fe_2O_3 dengan perbandingan mol sebesar 1 : 6, menghasilkan suatu bentuk fasa baru yang diduga adalah fasa $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$. Berdasarkan hasil identifikasi dengan menggunakan Tabel *Hanawalt*, bahwa puncak-puncak indek *Miller* dari sampel yang diperoleh menunjukkan bahwa puncak-puncak tersebut

Analisis Struktur Kristal $\text{SrO.6Fe}_2\text{O}_3$ Menggunakan Program General Structure Analysis System dan Pengujian Sifat Magnetnya (Perdamean Sebayang)



Gambar 1. Pola difraksi sinar-X bahan baku yang digunakan dan campurannya yang disinter pada suhu 1200 °C selama 10 jam



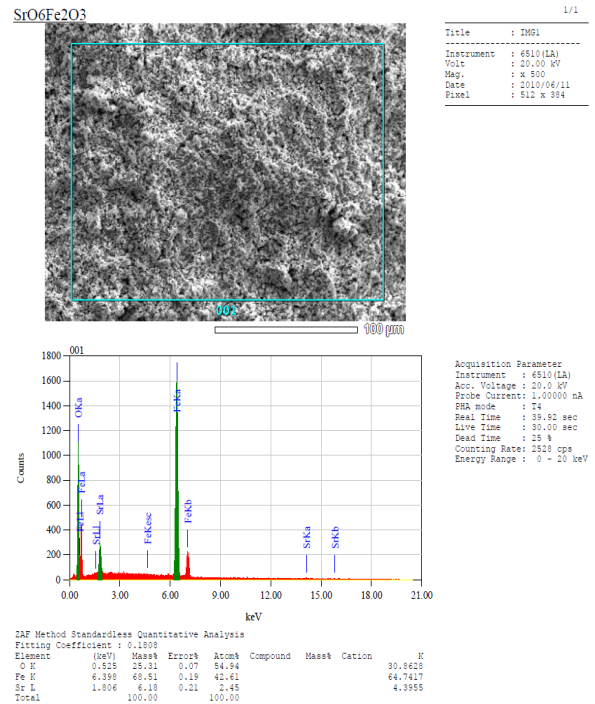
Gambar 2. Pola difraksi sinar-X sampel setelah disinter pada suhu 1200 °C selama 10 jam.

telah berimpit dengan fasa $\text{SrO.6 Fe}_2\text{O}_3$ seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.

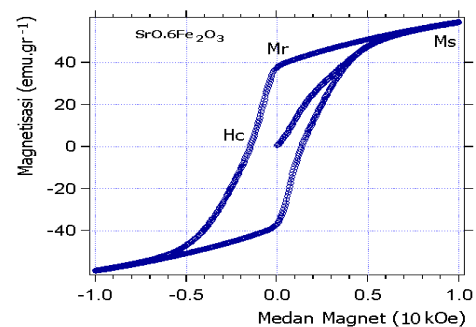
Pada Gambar 2 menunjukkan bahwa puncak difraksi *Bragg* yang dihasilkan diduga memiliki fasa tunggal (*single phase*) $\text{SrO.6 Fe}_2\text{O}_3$. Identifikasi fasa merujuk pada hasil penelitian sebelumnya yaitu ICDD 96-100-8365 [7]. Hasil reaksi dari kedua campuran tersebut diasumsikan tidak menghadirkan fasa asing. Asumsi ini didukung dari hasil pengamatan morfologi permukaan dengan menggunakan *SEM* dan analisis elementer dengan *EDS* seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3.

Pada Gambar 3 ditunjukkan bahwa sampel $\text{SrO.6 Fe}_2\text{O}_3$ terlihat sangat homogen yang terdistribusi merata diseluruh permukaan sampel. Berdasarkan hasil analisis elementer bahwa sampel hanya mengandung 3 unsur utama, yaitu: Stronsium (Sr), Besi (Fe), dan Oksigen (O) yang berturut-turut sebesar 6,18 %berat, 68,51 %berat, dan 25,31 %berat. Dengan demikian diduga bahwa bahan $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ telah terbentuk dengan baik.

Berdasarkan hasil identifikasi fasa dan analisis komposisi terbukti bahwa sampel tersebut adalah $\text{SrO.6 Fe}_2\text{O}_3$. Oleh karena bahan ini merupakan bahan magnetik maka seharusnya bahan ini juga memiliki sifat magnetik yang baik. Untuk membuktikan hal tersebut perlu dilakukan uji sifat magnetik dengan menggunakan alat *Vibrating Sample Magnetometer (VSM)*.



Gambar 3. Hasil analisis elementer sampel $\text{SrO.6 Fe}_2\text{O}_3$



Gambar 4. Kurva histeresis sampel $\text{SrO.6 Fe}_2\text{O}_3$

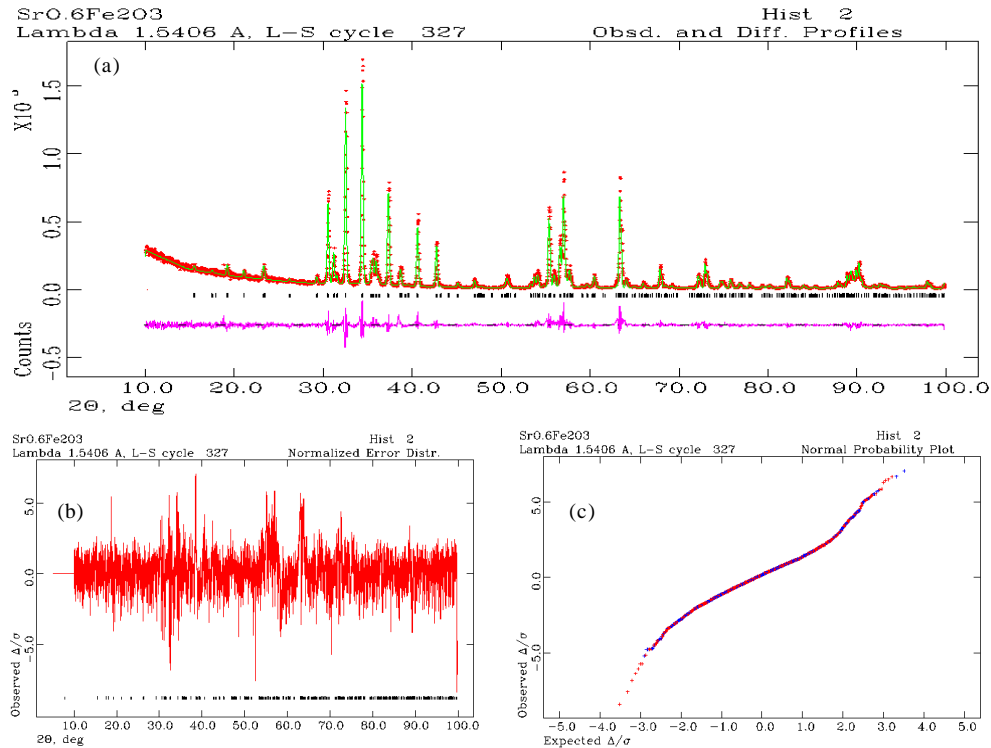
Pada Gambar 4 diperlihatkan kurva histeresis sampel $\text{SrO.6 Fe}_2\text{O}_3$ yang diukur pada medan magnet dari -10 kOe hingga 10 kOe. Sedangkan kurva histeresis *loop* sampel ini terdiri dari *intrinsic saturation (Ms)*, *remanence (Mr)* dan *coercivity (Hc)* yang hasilnya ditunjukkan pada Tabel 1.

Tinjauan lebih spesifik adalah analisis struktur kristal dengan perangkat lunak *General Structure Analysis System (GSAS)* dan menggunakan metode Rietveld analysis sehingga dapat diperoleh parameter struktur dari bahan ini.

Pada Gambar 5 ditunjukkan hasil *refinement* pola difraksi sinar-X sampel $\text{SrO.6 Fe}_2\text{O}_3$. Hasil *refinement* ini

Tabel 1. Data hasil pengukuran sifat magnetik sampel $\text{SrO.6 Fe}_2\text{O}_3$

Sample	Remanence, Mr (emu.g ⁻¹)	Saturation, Ms (emu.g ⁻¹)	Coercivity, Hc (Oe)
SrO.6Fe ₂ O ₃	43,21	68,01	1650



Gambar 5. Refinement pola difraksi sinar-X sampel $\text{SrO.6Fe}_2\text{O}_3$ (a) Profil observasi dan kalkulasi dari pola sampel difraksi sinar-X, (b) *Normalized error distribution* dan (c) *Normal probability plot*

menghasilkan kualitas *fitting* sangat baik dengan faktor R yang sangat kecil. Faktor R merupakan *criteria of fit* dan faktor χ^2 adalah *goodness of fit* yang bernilai sangat kecil seperti ditunjukkan pada Tabel 2, dan menurut Izumi nilai χ^2 (*chi-squared*) yang diperkenankan maksimum 1,3 [6].

Pada Gambar 5(a) tampak hasil refinement dari pola difraksi sinar-X sampel $\text{SrO.6Fe}_2\text{O}_3$ menunjukkan bahwa antara kurva observasi (pengukuran) dan kurva kalkulasi (kurva hasil perhitungan dengan menggunakan hasil referensi) terlihat hampir berimpit. Selisih kurva keduanya ditunjukkan pada Gambar 5(b) yang diindikasikan bahwa kurva dari *normalized error distribution* hanya meninggalkan puncak-puncak *background* saja yang berasal dari pengukuran sampel. Kualitas fitting juga ditunjukkan pada Gambar 5(c) yang idelnya merupakan garis lurus sehingga terhitung tingkat kesesuaiannya mendekati 93%.

Sedangkan jumlah titik equivalen per unit sel yang merupakan multiplisitas dari posisi wyckoff (neq),

jumlah atom equivalen per unit sel (n), faktor hunian atom (occ), posisi wyckoff (x, y, z) dan faktor thermal isotropic (viso) seperti ditunjukkan pada Tabel 3.

Posisi atom $\text{Fe}^{3+}(1)$, $\text{Fe}^{3+}(2)$, $\text{Fe}^{3+}(3)$, $\text{Fe}^{3+}(4)$, dan $\text{Fe}^{3+}(5)$ berturut-turut menempati posisi Wyckoff 2a, 2b, 4f, 4f₂, dan 12k. Kisi heksagonal tumpukan padat dari atom Ba dan O membentuk struktur octahedral dengan atom Fe pada posisi wyckoff (12k, 4f₂, dan 2a). Sedangkan dengan atom Fe pada posisi Wyckoff (4f₁) membentuk struktur tetrahedral, dan dengan atom Fe pada posisi Wyckoff (2b) membentuk struktur trigonal bipiramidal atau heksahedral. Satu unit sel heksagonal tumpukan padat ini mengandung 32 ion O^{2-} , 2 ion Sr^{2+} atau Ba^{2+} , dan 24 ion Fe^{3+} .

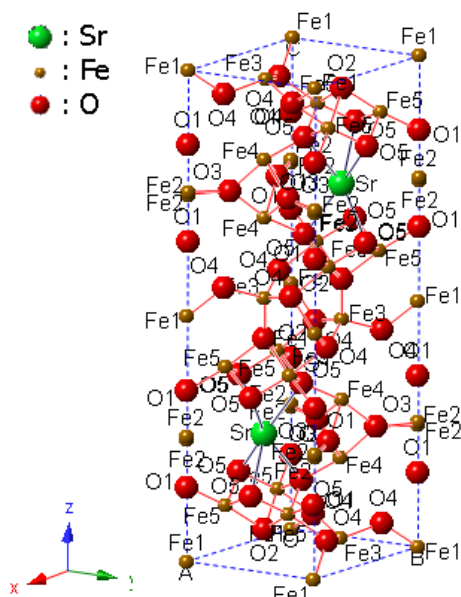
Ilustrasi dari struktur kristal sampel $\text{SrO.6Fe}_2\text{O}_3$ diperlihatkan pada Gambar 6, termasuk golongan kisi heksagonal tumpukan padat (*hexagonal closed packed lattice*) ferrite tipe M. Kation Fe pada posisi Wyckoff 12k, 2a, dan 2b memiliki momen *magnetic* dengan arah

Tabel 2. Kriteria (faktor R) dan *goodness of fit* (S).

Fasa $\text{SrO.6Fe}_2\text{O}_3$ (referensi M. Myndyk [8])		
Grup ruang (space group) : P 63/m m c (194) Sistem kristal : Hexagonal Parameter kisi : $a = 5.8807(6) \text{ \AA}$, $b = 5.8807(6) \text{ \AA}$ dan $c = 23.050(1) \text{ \AA}$, $\alpha = \beta = 90^\circ$ dan $\gamma = 120^\circ$ $V = 690.3(1) \text{ \AA}^3$ dan $\rho = 5.7172 \text{ gr.cm}^{-3}$		
Factor R	wRp = 18.88	χ^2 (chi-squared) = 1.087
	Rp = 13.51	

Tabel 3. Kriteria (faktor R) dan *goodness of fit* (S).

Fasa $\text{SrO.6Fe}_2\text{O}_3$ (referensi M. Myndyk [8])							
Atom	neq	occ	n	x	y	z	uiso
Ba2+	2	1	2	0.66667	0.33333	0.25	0.5(4)
Fe3+ (1)	2	1	2	0	0	0	0.19(6)
Fe3+ (2)	2	1	2	0	0	0.243(4)	1.5(1)
Fe3+ (3)	4	1	4	0.33333	0.66667	0.0256(7)	0.8(4)
Fe3+ (4)	4	1	4	0.33333	0.66667	0.1922(7)	0.2(5)
Fe3+ (5)	12	1	12	0.164(3)	0.327(2)	-0.1092(3)	0.3(2)
O2- (1)	4	1	4	0	0	0.153(2)	2.7(1)
O2- (2)	4	1	4	0.33333	0.66667	-0.051(2)	0.1(1)
O2- (3)	6	1	6	0.19(1)	0.38(1)	0.25	3.1(1)
O2- (4)	12	1	12	0.15(1)	0.30(1)	0.049(1)	0.4(9)
O2- (5)	12	1	12	-0.51(1)	-0.002(6)	0.155(1)	14.4(1)



Gambar 6. Struktur kristal sampel $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$

spin up (16 total per unit sel) sedangkan pada posisi Wyckoff 4f1 dan 4f2 memiliki momen magnetik dengan arah *spin down* (8 total per unit sel) [9].

KESIMPULAN

Pembuatan sampel *single phase* bahan magnet $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ telah berhasil dilakukan dengan struktur kristal heksagonal (grup ruang P 63/mmc), parameter kisi $a = b = 5,8807(6) \text{ \AA}$ dan $c = 23,050(1) \text{ \AA}$, $\alpha = \beta = 90^\circ$ dan $\gamma = 120^\circ$, volume unit sel sebesar $V = 690,3(1) \text{ \AA}^3$ dan kerapatan atomik sebesar $\rho = 5,72 \text{ g.cm}^{-3}$. Struktur heksagonal dibangun menjadi 4 blok sub unit yang disebut dengan 2 blok sub unit S ($\text{Fe}_6^{3+}\text{O}_8^{2-}$)²⁺ yang berjarak sebesar 5,027 Å dan 2 blok sub unit R ($\text{Ba}^{2+}\text{Fe}_6^{3+}\text{O}_{11}^{2-}$)²⁻ yang berjarak sebesar 6,504 Å. Bahan magnet $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ ini terdiri dari 3 unsur utama, yaitu: Stronsium (Sr) = 6,18 %, Besi (Fe) = 68,51 % dan Oksigen (O) = 25,31 % berat. Magnet $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ yang dihasilkan mempunyai *Remanence* (*Mr*) = 43,21 emu/g, Saturasi (*Ms*) = 68,01 emu/g dan *Coercivity* (*Hc*) = 1650 Oe.

DAFTAR ACUAN

- [1]. A. R. BOENO, L. M. GREGORY, M. C. S. NO' BREGAC, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **320** (2008) 864-870
- [2]. B. YU, L. QI, H. SUN, J. Z. YE, *J. Mater. Sci.*, **42** (2007) 3783-3788
- [3]. H. KOJIMA, *Fundamental Properties of Hexagonal Ferrites with Magnetoplumbite Structure*, Vol. 3; Ed. E. P. WOHLFARTH, North Holland Publishing Company, Amsterdam, 1982
- [4]. E. E. RAMS, R. M. GARCIA, E. REGUERA, H. M. SANCHEZ, and H. Y. MADEIRA, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **33** (2000) 2708-2715
- [5]. JOONGHOEDHO, E.K. LEE, J.Y. PARK, N.H. HUR, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **285** (2005) 164-168
- [6]. R. NOWOSIELSKI, R. BABILAS, G. DERCZ, L. PAJK, J. WRONA, *Archives of Materials Science and Engineering*, **28**(12) (2007) 735-742
- [7]. W. A. KACZMAREC, B. W. NINHAM, *J. Appl. Phys.*, **76** (10) (1994) 6065-6067
- [8]. F. IZUMI, *A Rietveld-Refinement Program RIETAN-94 for Angle-Dispersive X-Ray and Neutron Powder Diffraction*, National Institute for Research in Inorganic Materials 1-1 Namiki, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan, Revised on June 22, (1996)
- [9]. X. OBRADORS, A. COLLOMB, M. PERNET, D. SAMARAS, J. C. JOUBERT, *Journal of Solid State Chemistry*, **56** (1985) 171-181
- [10]. ÜMIT ÖZGÜRI, YAHYA ALIVOV, and HADIS MORKOÇ, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, Microwave Ferrites, Part 1: Fundamental Properties (2009)
- [11]. X. OBRADORS, X. SOLANS, A. COLLOMB, D. SAMARAS, J. RODRIGUEZ, M. PERNET, M. FONT-ALTABA, *Journal of Solid State Chemistry* **72** (1988) 218-224